**Journal of Water and Soil**
https://jsw.um.ac.ir

**Research Article**
**Vol. 39, No. 1, Mar.-Apr. 2025, p. 91-104**

# Growth, Physiological and Sucrose Indicators of Sugarcane Varieties to Silicon Application under Salinity Conditions

**A. Ansori Savari[1], M. Nabipour[1*], M. Farzaneh[1]**

1- Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.nabipour@scu.ac.ir)

| | |
|---|---|
| Received: 08-12-2024<br>Revised: 02-02-2025<br>Accepted: 04-02-2025<br>Available Online: 04-02-2025 | **How to cite this article:**<br>Ansori Savari, A., Nabipour, M., & Farzaneh, M. (2025). Growth, physiological and sucrose indicators of sugarcane varieties to silicon application under salinity conditions. *Journal of Water and Soil, 39*(1), 91-104. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2025.91154.1456 |

## Introduction

The high water demand of sugarcane in arid and semi-arid regions, combined with declining rainfall, has led to increased use of drainage water as a strategy for sustainable production management. It has been estimated that 20% of all cultivated land and 33% of irrigated agricultural land are affected by high salinity. Salinity stress poses two main threats to plants: ionic toxicity and osmotic stress. Ionic toxicity occurs when there is a significant accumulation of $Na^+$ in plant leaves under saline conditions. This disrupts the balance of water and ions, damages organelle structures, inhibits growth, and can ultimately lead to plant death. Some studies have shown that ion toxicity caused by $Na^+$ can inflict more irreversible damage on plants than osmotic stress. Silicon application (Si) showed improved photosynthetic efficiency, growth, and yield compared to plants under salt stress. Previous studies have also shown that silicon treatments can increase salinity tolerance in various plants, including wheat, corn, rice, and canola. However, the extent of silicon-mediated benefits under salinity can vary greatly between species and is largely dependent on the plant's capacity for element uptake dictated by its genetic makeup. There is limited information regarding the use of drainage water in sugarcane irrigation management in arid and semi-arid regions, as well as the potential for improving salinity stress through silicon application. Therefore, this study was conducted to evaluate the effects of Si on two sugarcane varieties irrigated with salt water.

## Materials and Methods

The pot experiment was conducted in a greenhouse under natural light at the agricultural site of Sugarcane Dehkhoda Company in Khuzestan Province, Iran, in 2021-2022. The temperature and humidity percentages are indicated in Figure 1. This study was carried out as split-split plot design based on randomized Block design (RBD). The main plot factors included three levels of salinity: control of 1.4±0.2 $dS.m^{-1}$ (S0) from the river water source, salinity stress of 4.1±0.2 $dS.m^{-1}$ (S1), and salinity stress of 8.2±0.2 $dS.m^{-1}$ (S2) from the drain water source, with a sub-factor of variety treatment (CP73-21 and CP69-1062). The silicon application timing was also considered as a sub-factor, with four levels: Si0, non-silicon application (Control); Si1, one month before salinity stress; Si2, during salinity stress; and Si3, after 30 days of salt stress, silicon was applied. The sugarcane sprouts are grown in polyethylene pots 100 cm in height and 45 cm in width. Each pot contained 100 kg of soil. A total of 216 experimental units were used during the experiment. The experimental pots were filled with a mixture of field soil and sugarcane filter cake in a 3:1 ratio. The results of the chemical analysis of field soil and filter cake are presented in Table 2. The salt stress was applied 113 days after growing cuttings and continued until harvest.



https://doi.org/10.22067/jsw.2025.91154.1456

## Results and Discussion

The results of the first year showed that salt stress significantly reduced the height of the sugarcane stalk. Also, at the salinity stress levels of 4.1 and 8.2 dS/m, the SPAD index decreased by 22.3% and 27%, respectively. Additionally, leaf sheath moisture dropped by 6.4% and 11.8%, electrolyte leakage increased by 11% and 22.7%, and the photosynthesis rate decreased by 28% and 42% compared to the control treatment. The optimal time to apply silicone fertilizer was one month prior to the onset of stress, which resulted in a significant improvement in all studied traits at salinity stress levels of 1.4 dS/m (control) and 4.1 dS/m. Furthermore, the qualitative analysis of sugarcane syrup in the second year revealed a decrease in sucrose percentage (14.1% and 33.5%, respectively) and white sugar content (12.6% and 40.9%, respectively) at salinity stress levels of 4.1 and 8.2 dS/m. The photosynthesis rate of sugarcane leaves decreased by 28.3 to 41.8 percent under salt stress levels of 4.1 and 8.2 dS, respectively. The CP69-1062 variety exhibited a better response compared to the CP73-21 variety, showing relative superiority in all growth and physiological traits studied.

## Conclusion

The results also indicated that the optimal time to apply silicon fertilizer to sugarcane plants was one month before the onset of stress, resulting in a significant improvement in all studied traits. The application of silicon fertilizer led to a 1 percent increase in sucrose, 3.7 percent increase in syrup purity, and 3 percent increase in white sugar yield compared to no application.

## Acknowledgments

We would like to express our special thanks to the Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz for the financial support (Grant number SCU.AA98.336).

**Keywords:** Drainage water, Stem height, Sucrose percentage, Stress

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۹، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱٤۰٤، ص. ۱۰٤-۹۱

# واکنش شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و ساکارز واریته‌های مختلف نیشکر به کاربرد سیلیکون در شرایط شوری آب

علی انصوری سواری [1]- مجید نبی پور [1]*- معصومه فرزانه [1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

## چکیده

شوری یکی از عوامل تنش‌زا است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر می‌گذارد. به‌منظور ارزیابی تأثیر سیلیکون بر رشد و عملکرد نیشکر تحت تنش شوری حاصل از زه‌آب زراعت نیشکر، آزمایشی در دو سال زراعی ۱۴۰۱- ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲- ۱۴۰۱ به‌صورت گلدانی در مجموعه کشاورزی شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا در قالب آزمایش اسپلیت اسپلیت پلات و طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی آبیاری در سه سطح شوری ۱/۴ (شاهد)، ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر، دو واریته CP73-21 و CP69-1062 و زمان کاربرد سیلیکون در چهار سطح شاهد (بدون کاربرد سیلیکون)، یک‌ماه قبل از تنش، همزمان با تنش و یک‌ماه بعد از اعمال تنش شوری به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد، تنش شوری ارتفاع ساقه نیشکر را به‌شدت کاهش داد. با آبیاری در سطح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب شاخص سبزینگی ۲۲/۳ و ۲۷ درصد، رطوبت نسبی برگ ۶/۴ و ۱۱/۸ درصد، نشت الکترولیت ۱۱ و ۲۲/۷ درصد، سرعت فتوسنتز ۲۸ و ۴۲ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. همچنین کاهش ۱۴/۱ و ۳۳/۵ درصدی ساکارز و ۲۰/۵ و ۴۲/۸ درصدی شکر سفید به‌ترتیب در آبیاری با سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر، برای واریته CP69-1062 نسبت به تیمار شاهد بدون تنش مشاهده شد. واریته CP69-1062 در همه صفات رشدی و فیزیولوژیکی توانایی بهتری نسبت به واریته CP73-21 از خود نشان داد. بهترین زمان کاربرد کود سیلیکون یک‌ماه قبل از اعمال تنش بود که سبب افزایش معنی‌دار همه صفات مورد مطالعه در تیمارهای آبیاری شده با سطوح شوری ۱/۴ و ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به عدم کاربرد سیلیکون گردید. با کاربرد سیلیکون درصدهای ساکارز، خلوص و شکر سفید به‌ترتیب ۱، ۳/۷ و ۳ درصد در واریته CP69-1062 افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از زه‌آب با شوری بالا از طریق ایجاد تنش یونی و اسمزی سبب کاهش ارتفاع ساقه نیشکر می‌گردد. لذا در سال‌هایی که منابع آبی کاهش پیدا می‌یابد می‌توان با اختلاط زه‌آب‌ها با شوری پایین و آب رودخانه به تولید پایدار نیشکر ادامه داد. همچنین به‌منظور کاهش شرایط تنش شوری می‌توان با تغذیه زودهنگام نیشکر با کود سیلیکون از آسیب‌های تنش کاست.

**واژه‌های کلیدی:** ارتفاع ساقه، تنش، درصد ساکارز، زه‌آب

## مقدمه

کل تولید صنعت نیشکر ایران در سال ۲۰۲۳ بالغ بر ۸/۵۹ میلیون تن بوده (با متوسط عملکرد ۹۴/۲۷ تن در هکتار) به‌عنوان یکی از مجموعه‌های نیشکر کوچک در جهان شناخته می‌شود که در مقایسه با متوسط عملکرد جهانی (۷۴/۹۵ تن در هکتار)، دارای ۲۵/۷ درصد عملکرد بالاتری است (FAO, 2024)، و یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی کشور محسوب می‌شود. گرمایش جهانی تأثیر زیادی بر شاخص‌های اقلیمی از جمله تغییر الگوی بارندگی، افزایش موج‌های گرمایی و سرمایی، سیل، خشکسالی و سایر تنش‌های غیر زنده گذاشته است (Parmesan *et al.*, 2022). منابع آبی و بارندگی در استان خوزستان نیز از این تغییرات بی‌نصیب نبوده و در برخی سال‌ها به شدت

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.nabipour@scu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2025.91154.1456

کاهش یافته است. از آنجایی‌که نیشکر یک محصول با بازده زیست توده بالا است که به مقدار قابل توجهی آب نیاز دارد، لذا مدیریت آبیاری مؤثر برای تولید موفق و پایدار نیشکر ضروری است. با این حال، آب حاصل از زه‌آبی‌زمین‌های زیر کشت نیشکر خوزستان در صورت مدیریت مقادیر $Na^+$ و $Cl^-$ می‌توانند منبع بسیار خوبی برای جبران کم آبی در برخی از ماه‌های سال باشد. یکی دیگر از عواملی که در رابطه با تنش شوری باید در نظر گرفته شود، تأثیر آن بر ترکیبات مغذی نیشکر است. تحت تنش شوری، گیاهان غلظت بالای پتاسیم و غلظت کم سدیم را در سیتوزول حفظ می‌کنند (Zhu, 2003). توانایی حفظ نسبت سیتوزولی $K^+/Na^+$ باعث افزایش تحمل به شوری در گیاهان می‌شود (Chao *et al.*, 2013). نیشکر به‌عنوان یک گیاه گلیکوفیت نسبتاً به تنش شوری حساس است (Patade *et al.*, 2008) و مشخص شده است که استفاده از آب شور اثرات نامطلوبی بر عملکرد و کیفیت آن دارد. تحقیقات نشان داده است که عملکرد گیاه نیشکر تحت تنش شوری در هدایت الکتریکی ۷ دسی‌زیمنس بر متر تا نزدیک به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Gomathi & Thandapani, 2005). از نظر کیفیت، هر یک دسی‌زیمنس بر متر افزایش در شوری خاک (آستانه ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر) باعث کاهش حدود ۰/۶ درصد در عدد بریکس[1] و درصد ساکارز عصاره نیشکر می‌گردد (Lingle & Wiegand, 1997). کاربرد برخی عناصر تغذیه‌ای مانند کلسیم (Al-Rubaiee, 2024)، پتاسیم (Che *et al.*, 2022)، منگنز (Rao *et al.*, 2015)، سیلیکون (Bocharnikova *et al.*, 2023)، اسید سالیسیلیک (Hoque *et al.*, 2020) و ... نشان داده است که می‌تواند مقاومت در برابر تنش شوری را در گیاهان افزایش دهد. نقش سیلیکون در تحمل به تنش خشکی و شوری، و اثرات مفید سیلیسیم بر رشد گیاه در شرایط کمبود مواد مغذی (Hernandez-Apaolaza, 2014)، و یا سایر تنش‌های غیر زنده (Guntzer *et al.*, 2011) گزارش شده است. سیلیکون در افزایش تحمل نیشکر به تنش شوری با بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی توانایی بسزایی دارد. این ماده اثرات نامطلوب شوری را با تنظیم هوموستاز یونی، به‌ویژه با کاهش جذب سدیم و تقویت جذب پتاسیم و سایر مواد مغذی ضروری، که برای حفظ عملکردهای سلولی در شرایط تنش حیاتی است، نقش دارد (Abbasi *et al.*, 2023; Ebeed *et al.*, 2024).

با توجه به افزایش تقاضا برای آبیاری در تولید نیشکر، مطالعه بیشتر در مورد اثرات تنش شوری بر نیشکر در ایران به‌طور فزاینده‌ای ضروری می‌باشد. بررسی‌های تنش شوری بر گیاه نیشکر عمدتاً به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از نمک NaCl به‌طور گسترده در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. امکان کاربرد زه آب‌های حاصل از کشت، جهت آبیاری این گیاه، محدود و نادر مطالعه شده است. همچنین کاربرد سیلیکون و تأثیر آن بر نیشکر تحت تنش شوری در داخل کشور به‌طور گسترده بررسی نشده است.

## مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی تأثیر سیلیکون بر رشد و کیفیت شربت نیشکر تحت تنش شوری آب، آزمایشی دو ساله طی سال‌های ۱۴۰۱- ۱۴۰۰ و ۱۴۰۲- ۱۴۰۱ به‌صورت گلدانی در گلخانه سایت کشاورزی شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا اجرا شد. آزمایش سال اول به‌صورت اسپلیت اسپلیت پلات در قالب بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی آبیاری در سه سطح شاهد با شوری (۰/۲ ±) ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر از آب رودخانه (S0) و شوری‌های (۰/۲ ±) ۴/۱ و (۰/۲ ±) ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر (به‌ترتیب S1 و S2) از منبع آب زه‌آب، فاکتور فرعی تیمار واریته در دو سطح با نام‌های CP73-21 و CP69-1062 و زمان کاربرد سیلیکون در چهار سطح شاهد بدون کاربرد سیلیکون (Si0)، یک‌ماه قبل از تنش (Si1)، همزمان با تنش (Si2) و یک‌ماه بعد از اعمال تنش شوری (Si3) به‌عنوان فاکتور فرعی فرعی در نظر گرفته شد. آزمایش سال دوم به‌صورت اسپلیت پلات در قالب بلوک کامل تصادفی بر روی واریته CP69-1062 که براساس نتایج آزمایش سال اول، متحمل‌تر به تنش شوری تعیین شد، در سه تکرار انجام شد. فاکتور اصلی شامل آبیاری در سه سطح شوری مشابه سال اول و فاکتور فرعی زمان کاربرد سیلیکون در دو سطح عدم کاربرد (شاهد) و زمان مؤثرتر در آزمایش اول، یک‌ماه قبل از تنش (Si1) بود. از لوله پلی اتیلن آبیاری از جنس پلی‌اتیلن نرم با قطر ۴۵/۷ سانتی‌متر و به‌طول ۱۲۰ سانتی‌متر به‌عنوان گلدان (وزن خاک گلدان ۸۶ کیلوگرمی) استفاده شد. گلدان‌ها با خاک زراعی و فیلترکیک نیشکر[2] به نسبت ۳ به ۱ پر شدند. قلمه‌ها به‌طول ۳ تا ۴ سانتی‌متر بریده شده و در لیوان‌های یک‌بار مصرف جوانه‌دار شده و سپس به گلدان‌های اصلی منتقل شدند (۵ بوته در گلدان و پس از استقرار به ۳ بوته تنک شدند). کود سیلیکونی از نوع پودری ($SiO_2$) تولید شرکت آریا شیمی حاوی ۷۰ درصد عنصر سیلیسیم به مقدار توصیه شده ۴ کیلوگرم در هکتار به‌کار برده شد. کود سیلیکون در سه زمان ۵ برگی، ۷ برگی و ۹ برگی نیشکر مطابق با یک ماه قبل، همزمان و یک ماه بعد از اعمال تنش شوری همراه با آبیاری استفاده شد.

---

۱- بریکس (Brix)، درصد مواد جامد حل شده در شربت نیشکر می‌باشد.

۲- فیلترکیک نیشکر (Sugarcane filter cake): این ماده باقیمانده از تصفیه شیره استخراج شده از آسیاب‌ها بوده که حاوی مواد آلی و مواد معدنی مهم مانند فسفر، نیتروژن و کلسیم می‌باشد و یکی از راه حل‌های جایگزینی کودهای شیمیایی در تغذیه مزارع نیشکر است.

**جدول ۱- نتایج آنالیز خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک، فیلترکیک و آب زه‌آب مورد مطالعه**

**Table 1– Results of the analysis of the physicochemical properties of the soil, filter cake, and drainage water studied**

| پارامترها Parameters | Soil Texture | EC ($dS.m^{-1}$) | pH ($H_2O$) | OM (%) | OC (%) | N (%) | Total P (%) | Total K (%) | $Na^+$ (%) | Si (mg/kg) | $Cl^-$ (Meq/L) | $Ca^{+2}$ (Meq/L) | $Mg^{+2}$ (Meq/L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| خاک Soil | Silty loam | 2.32 | 7.6 | 1.88 | 1.09 | 0.07 | 12.49 | 492 | 14.5 | 1.05 | 21.54 | 19.2 | 14.52 |
| زه‌آب Drainage water | - | 8.49 | 7.85 | - | - | - | - | – | 66.5 | - | 53.58 | 14.36 | 10.14 |
| فیلترکیک نیشکر Sugarcane filter cake | - | 1.28 | 7.8 | 38.53 | 22.4 | 1.42 | 1.68 | 0.44 | 0.22 | - | - | - | - |

برای جلوگیری از شستشوی کود سیلیکون و دسترسی بهتر ریشه گیاه به این کود، مقدار بکار رفته در هر زمان در دو قسط (دو نوبت آبیاری به فاصله ۳ روز) اعمال گردید. کود پایه براساس آزمون خاک و نیاز کوددهی، اوره ۷ گرم (در ۳ قسط) و سوپر فسفات به مقدار ۵ گرم در هر گلدان به‌کار برده شد. در برای تهیه محلول‌های شوری از یک مخزن ۵ هزار لیتری برای نگهداری آب رودخانه و دو مخزن ۲ هزار لیتری برای آب زه‌آب استفاده شد. تهیه سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر با اختلاط نسبت‌های متفاوت از آب زه‌آب و آب رودخانه حاصل شدند. در تاریخ ۲۰ خردادماه زمانی که مرحله پنجه‌زنی پایان یافته و گیاه در مرحله اولیه رشد سریع بود (۷-۸ برگی)، تیمار تنش شوری بصورت پلکانی اجرا شد. مشخصات خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک زراعی، فیلترکیک و آب زه‌آب در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع ساقه گیاه نیشکر یک بوته از هر تیمار به‌عنوان نماینده مشخص و ارتفاع آن هر هفته مطابق سیستم کراپ لاگی شرکت‌های توسعه نیشکر ثبت گردید. شاخص سبزینگی برگ، با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-502, Minolta, Japan) از آخرین برگ‌های کاملاً توسعه یافته انجام شد. برای تعیین درصد رطوبت نسبی برگ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید. که RWC درصد رطوبت نسبی برگ، FW وزن تازه برگ (گرم)، SW وزن اشباع شده برگ (گرم) و DW وزن خشک برگ (گرم) می‌باشد (Ritchie *et al*., 1990).

$$RWC\ (\%) = \frac{(FW-DW)}{(SW-DW)} \times 10 \qquad (۱)$$

درصد نشت الکترولیت (RP) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید که در آن EC0 هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس برمتر) قرائت شده اولیه ۳ تا ۵ ثانیه بعد از قرار دادن قطعات ۱ تا ۲ سانتی‌متری برگ در آب مقطر، EC1 هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس برمتر) قرائت شده نمونه بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای ۴ درجه و EC2 هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس برمتر) نمونه‌ها بعد از ۱۵ دقیقه اتوکلاو و خنک شدن در دمای اتاق می‌باشد (Zhao *et al*., 1992).

$$RP\% = \left(\frac{EC1-EC0}{EC2-EC0}\right) \times 100 \qquad (۲)$$

اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز با استفاده از دستگاه IRGA (Biosynthetic LTD, Hoddoson, UK LCA 4) انجام شد. در این روش پس از تنظیم دستگاه، حدود ساعت ۹ صبح تا نهایت ۱۲ ظهر قسمت وسطی برگ بالغ در داخل محفظه اندازه‌گیری قرار داده و در یک محدوده مشخص از تابش فعال فتوسنتزی (۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) بعد از ۶۰ ثانیه عدد مربوط برای ۳ برگ از دو بوته انتخابی ثبت و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود (Gehring, 2013).

در انتهای فصل رشد (۲۸۸ روز بعد از کشت در گلدان‌های اصلی)، تعداد سه ساقه به‌طور تصادفی برداشت و پس از سرزنی و حذف پوشال، عصاره با آسیاب سه غلطکی استخراج شد. درصد ساکارز عصاره (Pol) استخراج شده با دستگاه پلاریمتر (SCHMIDT, Saccharomat Nir W2 Schmidt, Canada) و درصد بریکس (Brix) با دستگاه رفراکتومتر (SW, Schmidt, Canada-SCHMIDT, Dur) تعیین شد (Chen & Chou, 1993; KG, 2009). درصد ساکارز واقعی (Main Pol) با توجه به درصد قرائت شده و ضرایب جدول مربوطه محاسبه شد. درجه خلوص (pyt) با استفاده از رابطه (۳) تعیین گردید که در آن، pol درصد ساکارز و brix درصد بریکس است.

$$pyt\ (\%) = \frac{Pol}{Brix} \qquad (۳)$$

برای محاسبه درصد شکر سفید یا تصفیه شده (RS) از رابطه (۶) محاسبه شد (KG, 2009). برای این منظور ابتدا بایستی درصد شکر زرد را محاسبه کنیم. شکر زرد از دو رابطه نسبت کیفیت (۴) و عملکرد (۵) محاسبه می‌شود.

$$Quality\ Ratio = \frac{79.3126 \times (pyt-1)}{(pyt-1)-35.5} \div Main\ Pol \qquad (۴)$$

$$Yield = \frac{100}{Quality\ Ratio} \qquad (۵)$$

$$RS = Yield \times 0.83 \qquad (۶)$$

## تجزیه آماری

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. برازش معادلات و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Sigma Plot انجام شد. داده‌های تغییرات مقدار ارتفاع تجمعی نیشکر طبق رابطه (۷) با تابع سه پارامتره گاوس برازش داده شد. در این رابطه Y، مقدار سرعت رشد هفتگی نیشکر (سانتی‌متر در هفته) در هر زمان (x) از فصل رشد می‌باشد، b، شیب خط و x0 زمانی است که گیاه به حداکثر مقدار رشد در هفته می‌رسد.

$$Y = ae^{[-0.5(b(x-x0)^2]} \quad (۷)$$

## نتایج و بحث

### ارتفاع ساقه نیشکر تحت تأثیر تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون

نتایج تجزیه واریانس صفات در سال اول نشان داد که تیمارهای تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون و برهمکنش کاربرد سیلیکون و تنش شوری در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع ساقه نیشکر داشتند (جدول ۲).

نتایج سال اول نشان داد ارتفاع ساقه واریته CP69-1062 به‌طور معنی‌داری از واریته CP73-21 بلندتر بود. در هر دو واریته به‌طور میانگین با افزایش شوری تا سطح ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر ارتفاع ساقه نسبت به شاهد به‌ترتیب ۳۴/۶ و ۶۵/۵ درصد کاهش نشان داد. برهمکنش کاربرد سیلیکون و تنش شوری نشان داد کاربرد سیلیکون باعث افزایش ارتفاع ساقه در تمام سطوح شوری شد و این افزایش ارتفاع ساقه با مصرف زودهنگام سیلیکون (Si1) به‌طور معنی‌داری بیشتر بود به‌طوری‌که نسبت به شاهد در هر سه سطح شوری، بیشترین ارتفاع ساقه مربوط به زمانی بود که سیلیکون یک‌ماه قبل از تنش (Si1) مصرف شد و ارتفاع ساقه در کاربرد همزمان سیلیکون و اعمال تنش شوری (Si2) در گروه آماری بعدی قرار گرفتند. با کاربرد دیرهنگام سیلیکون از تأثیر آن بر ارتفاع ساقه کاسته شد و فقط در سطح شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر افزایش ارتفاع ساقه نسبت به شاهد مربوطه‌اش معنی‌دار گردید (شکل ۱).

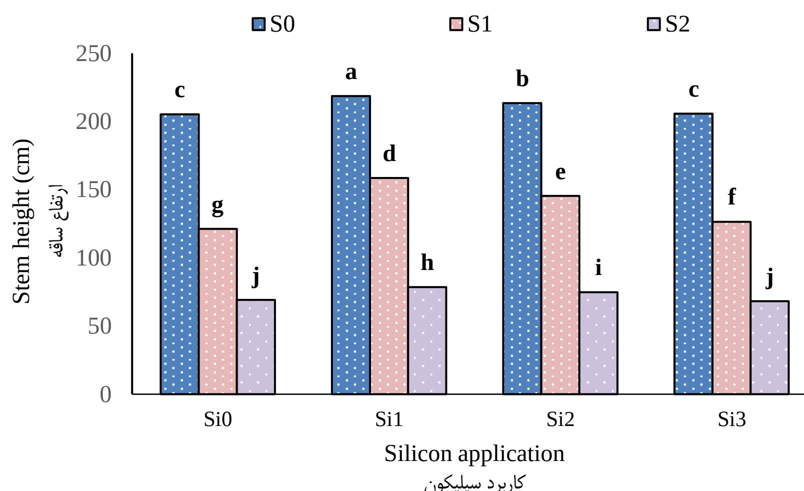
**جدول ۲- نتایج سال اول تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ارتفاع و برخی صفات فیزیولوژیکی دو واریته نیشکر تحت تنش شوری و کاربرد سیلیکون**

**Table 2- Results of the first year of analysis (mean of squares) of variance of height and some physiological traits of two sugarcane varieties under salt stress and silicon application**

| منابع تغییرات Sources of variance | df | ارتفاع ساقه Stam height | شاخص سبزینگی SPAD | سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate | رطوبت غلاف برگ Leaf-sheath moisture | نشت الکترولیت Electrolyte leakage |
|---|---|---|---|---|---|---|
| بلوک Block | 2 | 0.09 | 0.23 | 13.40 | 4.81 | 1.46 |
| (S) تنش شوری Salinity stress | 2 | 210.45** | 943.83** | 3249** | 506.2** | 2689** |
| خطای(S) Error (S) | 4 | 0.02 | 2.84 | 12.08 | 0.55 | 0.18 |
| واریته(V) Variety | 1 | 0.08ns | 18.50** | 256.8** | 18.80** | 97.53** |
| S×V | 2 | 0.009ns | 0.22ns | 32.52** | 2.73ns | 1.34ns |
| خطای(V) | 6 | 0.010 | 0.46 | 4.03 | 0.45 | 0.65 |
| سیلیکون(Si) | 3 | 2.90** | 5.53* | 5.70* | 18.15** | 12.65** |
| S×Si | 6 | 0.42** | 0.59ns | 0.29ns | 2.76* | 0.88ns |
| V×Si | 3 | 0.006ns | 0.08ns | 0.69ns | 0.02ns | 0.50ns |
| S×V×Si | 6 | 0.019ns | 0.21ns | 1.69ns | 0.51ns | 0.66ns |
| خطای کل Total error | 36 | 0.029 | 0.23 | 1.52 | 0.95 | 0.75 |
| درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%) | | 2.99 | 1.33 | 2.95 | 1.22 | 2.38 |

ns، ** و * به‌ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p\leq0.01$ and $p\leq0.05$, respectively.




**شکل ۱- برهمکنش کاربرد سیلیکون و تنش شوری بر ارتفاع ساقه نیشکر**

نکته: عدم کاربرد سیلیکون (Si0)، کاربرد سیلیکون یک ماه قبل از تنش (Si1)، کاربرد سیلیکون همزمان با تنش شوری (Si2) و کاربرد سیلیکون یک ماه بعد از تنش شوری (Si3). میانگین‌هایی که حروف مشترک دارند در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

**Figure 1- Interaction effect of silicon application and salinity stress on sugarcane stem height**

Notes. No application of silicon ($Si_0$), application of silicon one month before salinity stress ($Si_1$), sametime with salinity stress ($Si_2$) and one month after salinity stress ($Si_3$). The means with the same letter in the column have no differences ($P< 0.05$)

مطالعه‌ای که بر روی ذرت انجام شده، نشان داد که گیاهان تیمار شده با سیلیکون باعث بهبود کارایی فتوسنتز و افزایش ویژگی‌های رشدی و عملکرد در مقایسه با گیاهان عدم کاربرد سیلیکون تحت تنش شوری شدند (Khan *et al*., 2017). علاوه بر ذرت، تأثیر کاربرد سیلیکون در بهبود تحمل به شوری در سایر گیاهان مانند برنج (Flam-Shepherd *et al*., 2018) و کلزا (Hashemi *et al*., 2010) نیز گزارش شده است. مزایای کاربرد سیلیکون تحت تنش شوری تا حد زیادی از گونه‌ای به گونه دیگر متفاوت است و بیشتر به خصوصیات ژنتیکی گیاه برای جذب عنصر بستگی دارد (Dhiman *et al*., 2021). کاربرد سیلیکون گیاهان را در برابر آسیب غشایی ناشی از نمک محافظت می‌کند (Aras *et al*., 2020). کود سیلیکونی همچنین به غشای سلولی گیاهانی که تحت تنش شوری رشد می‌کنند، استحکام می‌بخشد (Zhang *et al*., 2018).

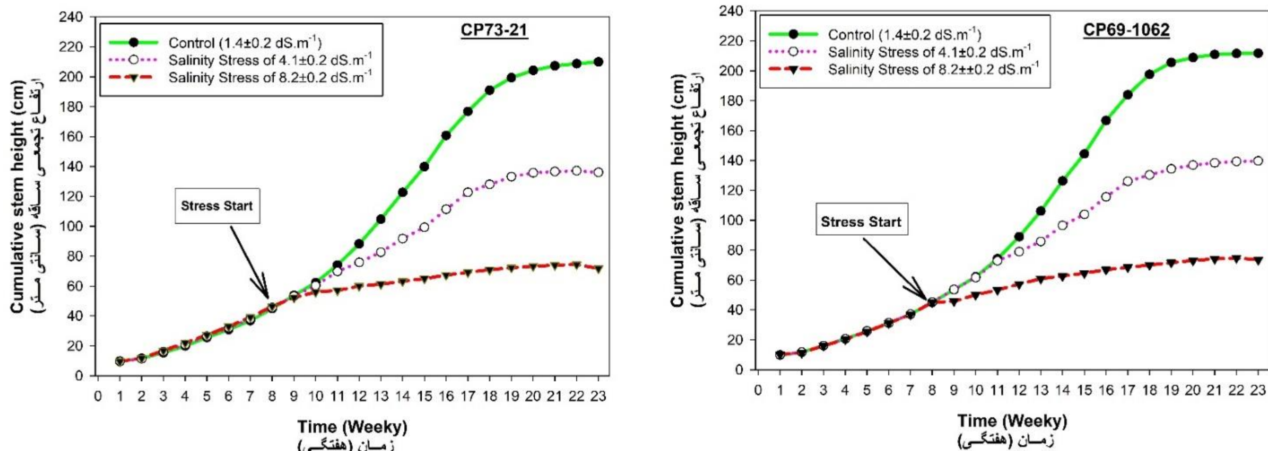
داده‌های ارتفاع ساقه نیشکر در طی فصل براساس معادله سه پارامتری گاوس برازش شد که به‌طور معنی‌داری نشان داد در بین سه سطح تنش شوری، بیشترین ارتفاع ساقه (۲۱۵ سانتی‌متر) در تیمار شاهد برای واریته CP69-1062 و کمترین ارتفاع ساقه (۷۴/۱۱ سانتی‌متر) در تیمار تنش شوری ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر برای واریته CP73-21 حاصل شد. افزایش سطح تنش شوری از ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار شاهد به ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۶۵ و ۶۵/۴ درصدی به‌ترتیب در ارتفاع ساقه واریته CP73-21 و CP69-1062 شد (شکل ۲). واریته CP69-1062 نسبت به واریته CP73-21 در تعداد هفته کمتر و با شیب ملایمتری به حداکثر ارتفاع ساقه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش رسید (جدول ۳).

تنش شوری باعث ایجاد تنش اسمزی و کاهش توانایی ریشه نیشکر در جذب آب می‌شود و حتی در شرایط شدید شوری باعث ایجاد سمیت یونی $Na^+$ و $Cl^-$ خواهد شد. کاهش توانایی جذب آب باعث کاهش RWC شده و گیاه فشار تورگر[1] خود را از دست داده و موجب خشکی فیزیولوژیکی می‌گردد. علاوه بر این، هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و بسته شدن روزنه باعث کاهش فتوسنتز و ارتفاع ساقه خواهد شد. ارتفاع ساقه نیشکر حساسترین صفت نسبت به تنش شوری می‌باشد (Zhao *et al*., 2020).

## صفات فیزیولوژیک نیشکر تحت تأثیر تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون

**شاخص سبزینگی:** با توجه به نتایج تجزیه واریانس سال اول، تیمارهای تنش شوری و واریته در سطح یک درصد و کاربرد سیلیکون در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر شاخص سبزینگی برگ نیشکر داشتند (جدول ۲). با افزایش سطح شوری، کاهش ۲۲/۳ و ۲۷ درصدی میزان سبزینگی به‌ترتیب در سطح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به شاهد مشاهده شد (جدول ۴). شاخص سبزینگی در واریته CP69-1062 با اختلاف معنی‌داری، ۲/۷ درصد بیشتر از واریته CP73-021 بود.

1- Turgor pressure




**شکل ۲- روند تغییرات ارتفاع هفتگی نیشکر در طی فصل رشد (هر نقطه در هر سطح شوری میانگینی از ٤ سطح کاربرد سیلیکون در ۳ تکرار) در دو واریته نیشکر CP73-21 و CP69-1062**

(نقاط داده‌های اندازه‌گیری و خطوط حاصل از برازش تابع هستند)

**Figure 2- The trend of weekly height changes of sugarcane during the growing season(each point at each salinity level is an average of 4 levels of silicon loading in 3 replicates) in two sugarcane varieties CP73-21 and CP69-1062**

(The data points measured and the lines resulting are function fits)

**جدول ۳- ضرایب حاصل از برازش معادله سه پارامتری گاوس به داده‌های ارتفاع نیشکر در طی فصل رشد تحت تنش شوری واریته های CP73-21 و CP69-1062**

**Table 3- Fitted three-parameter Gaussian equation coefficients to sugarcane height data during the growing season under salinity stress of CP73-21 and CP69-1062 varieties**

| سطوح شوری<br>**Salinity levels** | a (حداکثر ارتفاع (سانتی‌متر))<br>**a (Maximum height (cm))** | b (شیب خط)<br>**b (Line slope)** | $x_0$(تعداد هفته رسیدن به حداکثر ارتفاع)<br>**x0 (Time to reach maximum height)** | $R^2$ | سطح احتمال<br>**Probability level** |
|---|---|---|---|---|---|
| CP73-21 | | | | | |
| Control (1.4±0.2 dS.m$^{-1}$) | 211.740 (2.117) | 7.907 (0.182) | 22.089 (0.265) | 0.997 | 0.0001 |
| S1 (4.1±0.2 dS.m$^{-1}$) | 138.078 (1.090) | 9.266 (0.172) | 22.025 (0.249) | 0.998 | 0.0001 |
| S2 (8.2±0.2 dS.m$^{-1}$) | 74.117 (1.302) | 10.163 (0.533) | 19.063 (0.574) | 0.969 | 0.0001 |
| CP69-1062 | | | | | |
| Control (1.4 dS.m$^{-1}$) | 215.00 (2.359) | 7.639 (0.203) | 21.709 (0.284) | 0.996 | 0.0001 |
| S1 (4.1±0.2 dS.m$^{-1}$) | 140.125 (0.742) | 9.038 (0.118) | 21.655 (0.165) | 0.999 | 0.0001 |
| S2 (8.2±0.2 dS.m$^{-1}$) | 74.290 (0.969) | 9.855 (0.374) | 19.679 (0.432) | 0.986 | 0.0001 |

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده خطای استاندار می‌باشد.

Standard errors are in parentheses

در میان تیمارهای کاربرد سیلیکون، کاربرد زودهنگام سیلیکون در یک‌ماه قبل از تنش شوری و بعد از آن کاربرد همزمان با تنش شوری به‌طور معنی‌داری شاخص سبزینگی بالاتری نسبت به شاهد (۳۵/۶ درصد) داشتند (جدول ۴).

کاربرد سیلیکون یک‌ماه بعداز تنش شوری سبب افزایش معنی‌دار شاخص سبزینگی نسبت به شاهد نگردید. کاهش سبزینگی نیشکر تحت تنش شوری تا ۵۶ درصد در مقایسه با تیمارهای بدون تنش گزارش شده است. لذا در شرایط تنش شوری، محتوای کلروفیل نیشکر در اثر فوتواکسیداسیون رنگدانه‌های فتوسنتزی و تخریب کلروفیل، کاهش می‌یابد. هرگونه وقفه در پتانسیل فتوسنتزی ناشی از کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی، راندمان تولید محصول نیشکر را کاهش می‌دهد (Sharma *et al.*, 2021).

**محتوای رطوبت نسبی برگ:** تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون و برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون تأثیر معنی‌داری بر محتوای رطوبت نسبی برگ نیشکر داشتند (جدول ۲). واریته CP69-1062 توانست رطوبت نسبی غلاف بالاتری (۱/۲ درصد) در مقایسه با واریته CP73-21 در خود حفظ نماید (جدول ۴). در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر رطوبت نسبی برگ به‌ترتیب ۶/۴ و ۱۰/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. محتوای نسبی آب برگ معیار مهمی برای ارزیابی توانایی مقابله با تنش شوری است (Abdelaal *et*

*al*., 2019). کاهش پتانسیل آبی ریزوسفر بدلیل تجمع بیش از حد نمک، موجب کاهش محتوی رطوبت نسبی می‌شود و توانایی جذب آب از خاک توسط گیاه کاهش می‌یابد (Ashraf *et al*., 2017). گیاه ذرت رشد یافته در سطوح بالای تنش شوری سبب کاهش قابل توجهی در محتوای نسبی آب برگ (۳۴-۴۰ درصد) می‌شود (Ali *et al*., 2021; Shah *et al*., 2021). گزارش شده است که تنش شوری در مراحل اولیه رشد نیشکر موجب کاهش رطوبت نسبی برگ خواهد شد اما در مراحل رشد سریع نیشکر تأثیر معنی‌داری ندارد (Brindha *et al*., 2019).

کاربرد سیلیکون سبب بهبود درصد رطوبت نسبی برگ نیشکر نسبت به شاهد شد. بیشترین رطوبت نسبی برگ نیشکر در همه سطوح شوری مربوط به تیمار یک‌ماه قبل از تنش بود. تأخیر در کاربرد سیلیکون، سبب شد که از تأثیر این بهبود دهنده در حفظ رطوبت نسبی برگ خصوصاً در سطوح شوری بالاتر کاسته شود (شکل ۳). برخی مطالعات نشان دادند که سیلیکون به‌عنوان مانعی مکانیکی از جذب $Na^+$ توسط ریشه‌ها شده و از کاهش پتانسیل اسمزی جلوگیری می‌نماید، لذا سبب بهبود روابط آبی گیاه می‌شود. کاربرد سیلیکون، جذب سدیم و انتقال از ریشه به اندام هوایی را تحت تنش شوری در نیشکر تا حد زیادی مهار کرد (Ashraf *et al*., 2009). سیلیسیم اثرات مضر تنش شوری را بر ارقام گندم دوروم و نان کاهش داده و سبب بهبود محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب در گیاهان تیمار شده گردید (Tuna *et al*., 2008). در برنج، رسوب سیلیکون در بافت‌های ریشه باعث کاهش جریان ورود یون‌های سدیم شد (Gong *et al*., 2006).

**نشت الکترولیت برگ:** تأثیر تنش شوری، واریته و کاربرد سیلیکون بر نشت الکترولیت برگ نیشکر معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین نشان داد در سطح تنش شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر نشت الکترولیت برگ به‌ترتیب از ۳۴/۳ درصد در شاهد به ۴۰/۲ و ۴۴/۴ درصد افزایش یافت (جدول ۴). واریته CP73-21 مقدار ۲/۳ درصد نشت الکترولیت بیشتری نسبت به واریته CP69-1062 نشان داد. افزایش نشت الکترولیت برگ واریته CP73-21 نشان‌دهنده پایداری کم آن نسبت به شوری می‌باشد. نشت الکترولیت برگ معیار مهمی برای ارزیابی توانایی مقابله با تنش شوری است (Abdelaal *et al*., 2019). بین زمان‌های کاربرد کود سیلیکون از لحاظ آماری نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۴). به‌طوری‌که بیشترین مقدار نشت الکترولیت برگ نیشکر مربوط به تیمار شاهد به میزان ۳۷/۲ درصد بود و با مصرف سیلیکون در یک‌ماه قبل از تنش و هم‌زمان با تنش این درصد به ۳۵/۵ و ۳۵/۶ درصد کاهش یافت که این کاهش نسبت به شاهد معنی‌دار بود. تخریب غشای پلاسمایی در اثر افزایش نشت الکترولیت با افزایش تنش شوری گزارش شده است (Norozi *et al*., 2019).

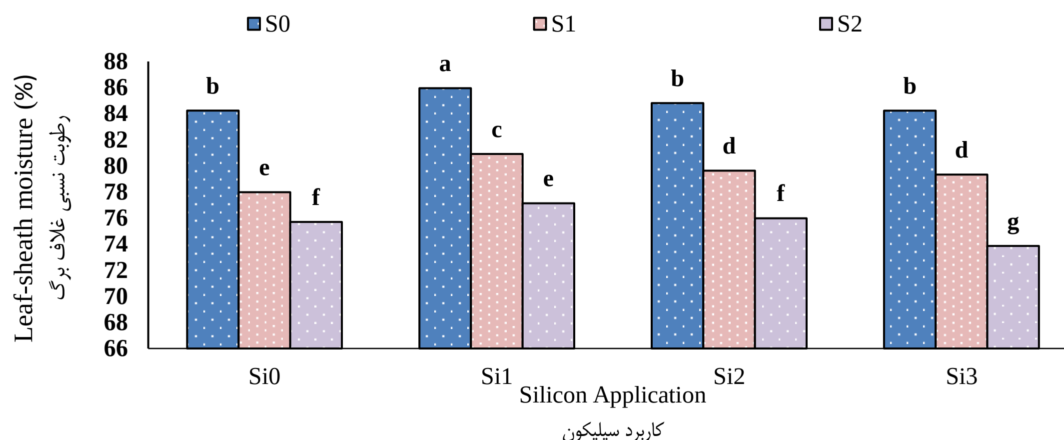
**جدول ٤- نتایج میانگین اثرات ساده سال اول صفات فیزیولوژیکی دو واریته نیشکر تحت تنش شوری و کاربرد سیلیکون**

**Table 4- Results of the average simple effects of the first year of physiological traits of two sugarcane varieties under salt stress and silicon application**

| تیمارها<br>Treatments | ارتفاع ساقه<br>Stem height (cm) | سبزینگی<br>SPAD | سرعت فتوسنتز<br>Photosynthetic rate (μmol $CO_2$. $M^{-2}$. $S^{-1}$) | رطوبت غلاف<br>Sheath moisture (%) | نشت الکترولیت<br>Electrolyte leakage (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| تنش شوری<br>(Salinity stress) | | | | | |
| Control (1.4 $dS.m^{-1}$) | 210.7[a] | 43.4[a] | 54.5[a] | 84.8[a] | 34.3[c] |
| 4.1 $dS.m^{-1}$ | 137.8[b] | 33.7[b] | 39.1[b] | 79.4[b] | 40.2[b] |
| 8.2 $dS.m^{-1}$ | 72.6[c] | 31.7[c] | 31.7[c] | 75.6[c] | 44.4[a] |
| واریته‌ها (Varieties) | | | | | |
| CP73-21 | 139.2[b] | 35.8[b] | 39.9[a] | 79.4[b] | 37.5[a] |
| CP69-1062 | 141.6[a] | 36.8[a] | 43.6[b] | 80.4[a] | 35.1[b] |
| سیلیکون (Silicon) | | | | | |
| Si0 | 131.8[c] | 35.6[b] | 41.0[b] | 79.3[c] | 37.2[a] |
| Si1 | 151.9[a] | 36.8[a] | 42.3[a] | 81.3[a] | 35.5[b] |
| Si2 | 144.5[b] | 36.6[a] | 42.0[a] | 80.1[b] | 35.6[b] |
| Si3 | 133.4[c] | 36.1[ab] | 41.7[ab] | 79.1[c] | 36.7[a] |

عدم کاربرد سیلیکون (Si0)، کاربرد سیلیکون یک ماه قبل از تنش شوری (Si1)، کاربرد سیلیکون همزمان با تنش شوری (Si2) و کاربرد سیلیکون یکماه بعد از تنش شوری (Si3). میانگین‌هایی که حروف مشترک دارند در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

No application of silicon ($Si_0$), application of silicon one month before salinity stress ($Si_1$), sametime with salinity stress ($Si_2$) and one month after salinity stress ($Si_3$). The means with the same letter in the column have no differences ($P< 0.05$)




**شکل ۳- برهمکنش تش شوری و کاربرد سیلیکون بر رطوبت نسبی غلاف برگ نیشکر**

**Figure 3- Interaction between salinity and silicon application on sugarcane leaf sheath moisture**

کوددهی سیلیکون به گیاهان آنها را در برابر آسیب غشایی ناشی از شوری محافظت می‌کند (Aras *et al.*, 2020). کود سیلیکونی همچنین به غشای سلولی گیاهانی که تحت تنش شوری رشد کرده، استحکام می‌بخشد. افزودن کود سیلیکون در خاک‌های شور سبب کاهش نشت الکترولیتی شده و از این رو نشت یونی غشای پلاسمای و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی جلوگیری می‌کند (Heile *et al.*, 2021). همچنین گزارش شده، کاربرد سیلیکون پراکسیداسیون لیپیدها، نشت الکترولیت و محتوای $H_2O_2$ را در گیاهان نخود تحت تنش شوری کاهش داد (Shahid *et al.*, 2015). این نشان‌دهنده این است که سیلیکون به‌طور بالقوه دارای اثر ضد تنش شوری بواسطه تثبیت غشای پلاسمایی است (Yan *et al.*, 2021).

## تأثیر کاربرد سیلیکون بر صفات کیفی شربت ساقه نیشکر تحت شرایط شوری آب

**درصد ساکارز:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد تنش شوری تأثیر معنی‌داری بر درصد ساکارز عصاره نیشکر داشت (جدول ۵). بیشترین درصد ساکارز به میزان ۱۶/۸ درصد در تیمار شاهد با شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. تنش شوری تأثیر منفی بر کیفیت شربت گذاشت به‌طوری‌که درصد ساکارز عصاره به ۱۴/۴ و ۱۱/۲ درصد به‌ترتیب در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافت. این کاهش درصد ساکارز از تنش یونی ناشی از تجمع بیش از حد عناصر سمی $Na^+$ و $Cl^-$ در سلول‌های پارانشیم ساقه و کاهش ظرفیت قندسازی بود. تنش شوری در نیشکر سبب کاهش کیفت شربت نیشکر می‌گردد (Brindha *et al.*, 2019). برخی گزارشات کاهش درصد ساکارز عصاره ساقه نیشکر تحت شرایط تنش سطوح شوری ۴ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر را بین ۴/۲ تا ۸/۹ درصد گزارش داده‌اند (Dhansu *et al.*, 2022).

**درصد خلوص:** بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تنش شوری و کاربرد سیلیکون و برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون اثر معنی‌داری بر درصد خلوص شربت ساقه نیشکر داشتند (جدول ۵). در شرایط عدم تنش شوری، تفاوت معنی‌داری بین درصد خلوص در کاربرد و عدم کاربرد سیلیکون مشاهده نشد ولی کاربرد سیلیکون، افزایش معنی‌دار درصد خلوص شربت در شرایط تنش نسبت به تیمارهای عدم کاربرد سیلکون را در پی داشت (شکل ۴).

**درصد بریکس:** با توجه به نتایج، درصد بریکس به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر تنش شوری و کاربرد سیلیکون قرار گرفت (جدول ۵). با توجه به معنی‌دار شدن برهمکنش، تأثیر کاربرد سیلکون بر درصد بریکس بسته به سطح شوری آب متغیر بود. به‌عبارتی در تیمار شاهد (عدم وجود تنش شوری) کاربرد سیلیکون تأثیر معنی‌داری بر درصد بریکس نشان نداد. امّا در زمان وجود تنش شوری، کاربرد کود سیلیکون سبب کاهش معنی‌دار درصد بریکس نسبت به شاهد گردید (شکل ۴).

**درصد شکر سفید:** درصد شکر سفید یا شکر تصفیه شده، صفتی قابل اطمینان برای ارزیابی کیفیت شربت ساقه نیشکر می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تنش شوری و کاربرد سیلیکون تأثیر معنی‌داری بر درصد شکر سفید نیشکر داشت (جدول ۵). درصد شکر سفید با افزایش شوری آب از سطح شاهد (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) به شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب از ۱۰/۷۵ به ۸/۵۵ و ۶/۱۴ درصد کاهش یافت. در هر سطح شوری، کاربرد سیلیکون افزایش درصد شکر سفید (۸/۶۱ درصد) نسبت به عدم کاربرد سیلیکون (۸/۳۵ درصد) را در برداشت داشت.

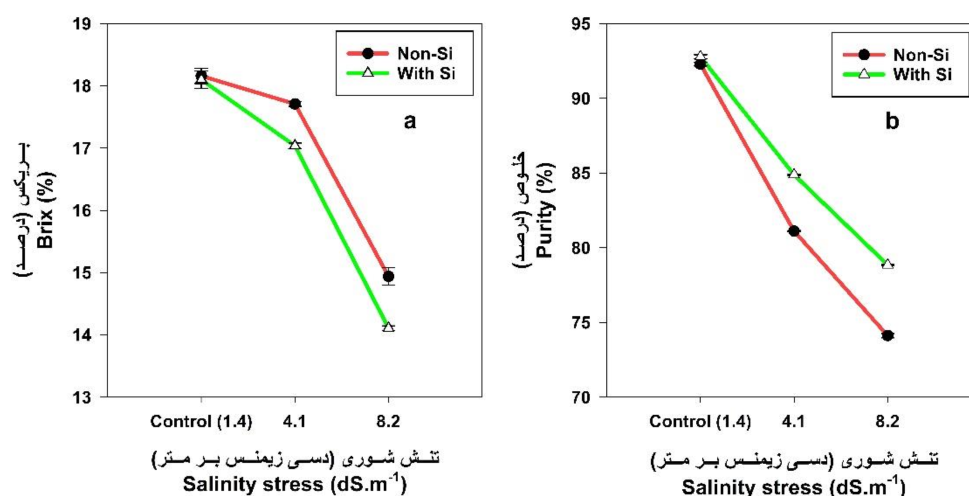
جدول ۵- نتایج سال دوم تجزیه واریانس و برش‌دهی برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون بر فاکتورهای کیفی شربت ساقه نیشکر

**Table 5- Results of the second year of variance analysis and segmentation of the interaction of salinity stress and silicon application on quality factors of sugarcane stalk juice**

| منابع تغییرات<br>Sources of variance | df | درصد ساکارز<br>Pol% | درصد بریکس<br>Brix% | درصد خلوص<br>Purity% | درصد شکر سفید<br>RS% |
|---|---|---|---|---|---|
| بلوک<br>Block | 2 | 0.016 | 0.077 | 2.11 | 0.014 |
| (S) تنش شوری<br>Salinity stress | 2 | 47.09** | 21.69** | 39.12** | 31.83** |
| Sشوری خطای<br>Salinity erorr | 4 | 0.018 | 0.079 | 2.25 | 0.015 |
| Siکاربرد سیلیکون | 3 | 0.073ns | 1.23** | 40.59** | 0.31** |
| S×Si | 6 | 0.018ns | 0.24* | 7.37* | 0.047ns |
| خطای کل<br>Total error | 18 | 0.022 | 0.045 | 1.19 | 0.009 |
| درصد ضریب تغییرات<br>CV(%) | | 1.05 | 1.27 | 1.30 | 1.13 |

ns، ** و * به‌ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p≤0.01$ and $p≤0.05$, respectively.




شکل ٤- برهمکنش تنش شوری و کاربرد سیلیکون بر درصد بریکس (a) و درصد پیوریتی (b) شربت نیشکر

**Figure 4- Interaction of salinity stress and silicon application on Brix percentage (a) and purity percentage (b) of sugarcane juice**

تنش شوری از چند طریق درصد شکر تصفیه شده را کاهش می‌دهد. در مرحله نخست، تنش شوری از طریق کاهش سطح برگ و منبع فتوسنتز، رشد نیشکر را کاهش داده و در نتیجه از میزان ساقه و زیست‌توده کاسته می‌شود، که این امر سبب کاهش شکر سفید تولیدی در واحد سطح خواهد شد (Lingle & Wiegand, 1997). تنش شوری با ایجاد تنش اسمزی، گیاه را تحت تنش خشکی فیزیولوژیکی قرار داده و میزان عصاره قابل استحصال (ضریب استحصال ساقه) را بشدت کاهش می‌دهد. علاوه بر این، تنش شوری سبب بروز تنش یونی در نیشکر می‌شود. در این شرایط راه‌کار دفاعی گیاه نیشکر انباشت یون‌های مضر $Na^{+}$ و $Cl^{-}$ در سلول‌های ذخیره‌ای ساقه می‌باشد، که منجر به کاهش کیفی شربت ساقه و استحصال شکر سفید خواهد شد. تجمع یون‌های با غلظت بالا در سلول‌های ذخیره‌ای ساقه ممکن است بر بیان ژن اینورتاز تأثیر بگذارد (Hussain *et al*., 2003).

افزودن پتاسیم و سیلیکون باعث افزایش درصد استخراج و بهبود کیفیت شربت ساقه در نیشکر می‌گردد که می‌تواند به اثرات آنها بر فعالیت آنزیم مربوط باشد (Munns *et al*., 2006). پتاسیم و سیلیکون فعالیت‌های اینورتاز، پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز، فسفاتاز و آدینوزین تری فسفاتاز را در نیشکر تنظیم می‌کنند. کاهش فعالیت فسفاتاز منبع بیشتری از پیش سازهای ضروری با انرژی بالا مورد نیاز برای رشد بهینه نیشکر و تولید قند را فراهم می‌کند (Savant *et al*., 1999).

همچنین گزارش شده است که پتاسیم، سنتز قند را در نیشکر با تنظیم فعالیت آنزیم‌های مختلف و با انتقال مؤثر قندها به اندام‌های مخزن بهبود می‌بخشد (Gomathi & Thandapani, 2005).

## نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از زه‌آب با شوری بالا از طریق ایجاد تنش یونی و اسمزی سبب کاهش ارتفاع ساقه نیشکر می‌گردد. لذا در سال‌هایی که منابع آبی کاهش می‌یابد، می‌توان با اختلاط زه‌آب‌ها با شوری پایین و آب رودخانه با تقبل کاهش در رشد و ارتفاع ساقه نیشکر به تولید پایدار نیشکر ادامه داد. با توجه به حساسیت نیشکر به شوری، افزایش تنش شوری سبب تشدید کاهش ارتفاع ساقه نیشکر بین ۳۴/۸ تا ۶۵ درصد به‌ترتیب در سطوح شوری ۴/۱ تا ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر در هر دو واریته مورد مطالعه شد. همچنین رطوبت نسبی برگ نیشکر در سطح شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس ۶/۴ درصد و سطح شوری ۸/۲ دسی‌زیمنس مقدار رطوبت نسبی را ۱۰/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. نشت الکترولیت برگ نیز با افزایش سطح شوری نیز به‌شدت افزایش یافت (به‌ترتیب ۱۷/۲ و ۲۹/۶ درصد). واکنش سرعت فتوسنتز برگ نیشکر تحت تأثیر تنش شوری بین ۲۸/۳ تا ۴۱/۸ درصد به‌ترتیب در سطوح تنش ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس کاهش یافت. واریته CP69-1062 عکس‌العمل بهتری نسبت به واریته CP73-21 از خود نشان داد و تقریباً در همه صفات رشدی و فیزیولوژی مورد مطالعه برتری نسبی از خود نشان داد. همچنین نتایج نشان دادند بهترین زمان کاربرد کود سیلیکون برای گیاه نیشکر، یک‌ماه قبل از اعمال تنش بود که سبب افزایش معنی‌دار همه صفات مورد مطالعه گردید. کاربرد کود سیلیکون توانست ۱ درصد ساکارز، ۳/۷ درصد خلوص شربت و ۳ درصد استحصال شکر سفید را نسبت به عدم کاربرد بهبود دهد.

در نهایت پیشنهاد می‌گردد با توجه به توانایی واریته CP69-1062 در مقابله با تنش شوری، به‌منظور کاهش ریسک و حفظ پایداری تولید شرکت توسعه نیشکر خوزستان در شرایط تغییرات اقلیمی فعلی، این واریته توسعه داده شود. همچنین در شرایط کاهش آورد آب رودخانه و بروز تنش کم‌آبی و خشکسالی، امکان اختلاط آب زه‌آب با آب رودخانه به منظور آبیاری گیاه نیشکر با تقبل کاهش محدودی در رشد گیاه اقدام گردد. در این شرایط می‌توان با استفاده از آب‌های زه‌آبی با درجه شوری پایین‌تر بشرط کاربرد زودهنگام کود سیلیکون از اثرات ناشی از شوری کاست و پایداری تولید نیشکر را بهبود بخشید.

## سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر تقبل هزینه‌های این تحقیق قدردانی می‌گردد (شماره پژوهانه SCU.AA1401.336).

## References


1. Abbasi, R.P., Rafiq, K., Fatima, S., Javed, M.T., Azeem, M., & Akram, M.S. (2023). In vitro silicon supplementation enhanced acclimatisation and growth of sugarcane (*Saccharum officinarum*) via improved antioxidant and nutrient acquisition patterns in saline soil. *Functional Plant Biology*, *51*(1), NULL. https://doi.org/10.1071/FP22275
2. Abdelaal, K.A., EL-Maghraby, L.M., Elansary, H., Hafez, Y.M., Ibrahim, E.I., El-Banna, M., El-Esawi, M., & Elkelish, A. (2019). Treatment of sweet pepper with stress tolerance-inducing compounds alleviates salinity stress oxidative damage by mediating the physio-biochemical activities and antioxidant systems. *Agronomy*, *10*(1), 26. https://doi.org/10.3390/agronomy10010026
3. Al-Rubaiee, F.A.A. (2024). Mitigation of salinity stress effects in tomatoa (*Lycopersicon esculentum* Mill.) by using calcium chloride. *Nabatia*, *12*(1), 26-42 .https://doi.org/10.21070/nabatia.v12i1.1636
4. Ali, M., Afzal, S., Parveen, A., Kamran, M., Javed, M.R., Abbasi, G.H., Malik, Z., Riaz, M., Ahmad, S., Chattha, M.S., Ali, M., Ali, Q., Uddin, M.Z., Rizwan, M., & Ali, S. (2021). Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na(+) uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. *Plant Physiology Biochemical*, *158*, 208-218. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.10.040
5. Aras, S., Keles, H., & Eşitken, A. (2020). Silicon nutrition counteracts salt-induced damage associated with changes in biochemical responses in apple. *Bragantia*, *79*, 1-7. https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190153
6. Ashraf, M., Rahmatullah, Afzal, M., Ahmed, R., Mujeeb, F., Sarwar, A., & Ali, L. (2009). Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant and Soil*, *326*(1-2), 381-391. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0019-9
7. Ashraf, M., Shahzad, S.M., Imtiaz, M., Rizwan, M.S., & Iqbal, M.M. (2017). Ameliorative effects of potassium nutrition on yield and fiber quality characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under NaCl stress. *Soil Environment*, *36*(1), 51-58. https:doi.org/10.25252/SE/17/31054
8. Bocharnikova, E.A., Nikpay, A., Majumdar, S., Ziaee, M., & Matichenkov, V.V. (2023). Bioactive silicon: Approach to enhance sugarcane yield under stress environment. In *Agro-industrial Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress* (pp. 85-105). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3955-6_5
9. Brindha, C., Vasantha, S., & Arunkumar, R. (2019). The response of sugarcane genotypes subjected to salinity

stress at different growth phases. *Journal of Plant Stress Physiology*, *5*, 28-33. https://doi.org/10.25081/jpsp.2019.v5.5643
10. Chao, D.Y., Dilkes, B., Luo, H., Douglas, A., Yakubova, E., Lahner, B., & Salt, D.E. (2013). Polyploids exhibit higher potassium uptake and salinity tolerance in Arabidopsis. *Science*, *341*(6146), 658-659. https://doi.org/10.1126/science.1240561
11. Che, Y., Fan, D., Wang, Z., Xu, N., Zhang, H., Sun, G., & Chow, W.S. (2022). Potassium mitigates salt-stress impacts on photosynthesis by alleviation of the proton diffusion potential in thylakoids. *Environmental and Experimental Botany*, *194*, 104708. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104708
12. Chen, J.C., & Chou, C.C. (1993). *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1177/003072706400400412
13. Dhansu, P., Kumar, R., Kumar, A., Vengavasi, K., Raja, A.K., Vasantha, S., Meena, M.R., Kulshreshtha, N., & Pandey, S.K. (2022). Differential physiological traits, ion homeostasis and cane yield of sub-tropical sugarcane varieties in response to long-term salinity stress. *Sustainability*, *14*(20), 13246. https://doi.org/10.3390/su142013246
14. Dhiman, P., Rajora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S.S., Kumar, A., Raturi, G., Chakraborty, K., Gupta, O. P., Devanna, B.N., Tripathi, D.K., & Deshmukh, R. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiol Biochem*, *162*, 110-123. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.023
15. Ebeed, H.T., Ahmed, H.S., & Hassan, N.M. (2024). Silicon transporters in plants: Unravelling the molecular Nexus with sodium and potassium transporters under salinity stress. *Plant Gene*, 100453. FAO. (2024). *faostat*, https://doi.org/10.1016/j.plgene.2024.100453
16. Flam-Shepherd, R., Huynh, W.Q., Coskun, D., Hamam, A.M., Britto, D.T., & Kronzucker, H.J. (2018). Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: the influence of silicon. *Journal of Experimental Botany*, *69*(7), 1679-1692. https://doi.org/10.1093/jxb/erx460
17. Gehring, C. (2013). Cyclic Nucleotide Signaling in Plants.
18. Gomathi, R., & Thandapani, T. (2005). Salt stress in relation to nutrient accumulation and quality of sugarcane genotypes. *Sugar Technology*, *7*, 39-47. https://doi.org/10.1007/bf02942416
19. Gong, H.J., Randall, D.P., & Flowers, T.J. (2006). Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. *Plant Cell Environment*, *29*(10), 1970-1979. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x
20. Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J.-D. (2011). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, *32*(1), 201-213. https//:doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8
21. Hashemi, A., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H.R. (2010). Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Science & Plant Nutrition*, *56*(2), 244-253. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00443.x
22. Heile, A.O., Aslam, Z., Hussain, A., Aslam, M., Saleem, M.H., Abualreesh, M.H., Alatawi, A., & Ali, S. (2021). Alleviation of cadmium phytotoxicity using silicon fertilization in wheat by altering antioxidant metabolism and osmotic adjustment. *Sustainability*, *13*(20), 11317. https://doi.org/10.3390/su132011317
23. Hernandez-Apaolaza, L. (2014). Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta*, *240*(3), 447-458. https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x
24. Hoque, T.S., Sohag, A.A.M., Burritt, D.J., & Hossain, M.A. (2020). Salicylic acid-mediated salt stress tolerance in plants. *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture*, *1*, 1-38. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_1
25. Hussain, A., Khan, Z.I., Rashid, M.H., Ashraf, M., & Akhtar, M.S. (2003). Soil salinity effects on sugarcane productivity, biochemical characteristics, and invertase activity. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, *1*(2), 114-121.
26. KG, A.B. (2009). *International commission for uniform methods of sugar Analysis (ICUMSA).* Barlin.
27. Khan, W.U.D., Aziz, T., Hussain, I., Ramzani, P.M.A., & Reichenauer, T.G. (2017). Silicon: a beneficial nutrient for maize crop to enhance photochemical efficiency of photosystem II under salt stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *63*(5), 599-611. https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1233322
28. Lingle, S.E., & Wiegand, C.L. (1997). Soil salinity and sugarcane juice quality. *Field Crops Research*, *54*(2-3), 259-268. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00058-0
29. Munns, R., James, R.A., & Lauchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, *57*(5), 1025-1043. https://doi.org/10.1093/jxb/erj100
30. Norozi, M., ValizadehKaji, B., Karimi, R., & Nikoogoftar Sedghi, M. (2019). Effects of foliar application of potassium and zinc on pistachio (*Pistacia vera* L.) fruit yield. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, *6*(1), 113-123.
31. Parmesan, C., Morecroft, M.D., & Trisurat, Y. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* GIEC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/
32. Patade, V.Y., Suprasanna, P., & Bapat, V.A. (2008). Effects of salt stress in relation to osmotic adjustment on

sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) callus cultures. *Plant Growth Regulation*, *55*(3), 169-173. https://doi.org/10.1007/s10725-008-9270-y

33. Rao, V.P., Sengar, R., Singh, S., & Sharma, V. (2015). Molecular and metabolic perspectives of sugarcane under salinity stress pressure. *Progressive Agriculture*, *15*(1), 77-84.
34. Ritchie, S.W., Nguyen, H.T., & Holaday, A.S. (1990). Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, *30*(1), 105-111. https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x
35. Savant, N.K., Korndörfer, G.H., Datnoff, L.E., & Snyder, G.H. (1999). Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of Plant Nutrition*, *22*(12), 1853-1903. https://doi.org/10.1080/01904169909365761
36. Shah, T., Latif, S., Saeed, F., Ali, I., Ullah, S., Alsahli, A.A., Jan, S., & Ahmad, P. (2021). Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Journal of King Saud University-Science*, *33*(1), 101207. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.10.004
37. Shahid, M.A., Balal, R.M., Pervez, M.A., Abbas, T., AQUEEL, M.A., Javaid, M.M., & Garcia-Sanchez, F. (2015). Foliar spray of phyto-extracts supplemented with silicon: an efficacious strategy to alleviate the salinity-induced deleterious effects in pea (*Pisum sativum* L.). *Turkish Journal of Botany*, *39*(3), 408-419. https://doi.org/10.3906/bot-1406-84
38. Sharma, A., Singh, R.K., Singh, P., Vaishnav, A., Guo, D.-J., Verma, K.K., Li, D.-P., Song, X.-P., Malviya, M.K., & Khan, N. (2021). Insights into the bacterial and nitric oxide-induced salt tolerance in sugarcane and their growth-promoting abilities. *Microorganisms*, *9*(11), 2203. https://doi.org/10.3390/microorganisms9112203
39. Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., & Girgin, A.R. (2008). Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany*, *62*(1), 10,16. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.06.006
40. Yan, G., Fan, X., Zheng, W., Gao, Z., Yin, C., Li, T., & Liang, Y. (2021). Silicon alleviates salt stress-induced potassium deficiency by promoting potassium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Plant Physiology*, *258-259*, 153379. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153379
41. Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X., & Xie, Z. (2018). Silicon promotes growth and root yield of *Glycyrrhiza uralensis* under salt and drought stresses through enhancing osmotic adjustment and regulating antioxidant metabolism. *Crop Protection*, *107*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.01.005
42. Zhao, D., Zhu, K., Momotaz, A., & Gao, X. (2020). Sugarcane plant growth and physiological responses to soil salinity during tillering and stalk elongation. *Agriculture*, *10*(12), 608. https://doi.org/10.3390/agriculture10120608
43. Zhao, Y., Aspinall ,D., & Paleg, L. (1992). Protection of membrane integrity in *Medicago sativa* L. by glycinebetaine against the effects of freezing. *Journal of Plant Physiology*, *140*(5), 541-543. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80785-6
44. Zhu, J.K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, *6*(5), 441-445. https://doi.org/10.1016/s1369-5266(03)00085-2